

# 过共晶球铁凝固过程中奥氏体的生长方式与形貌特征\*

徐锦锋 翟秋亚 袁森 魏兵  
(西安理工大学材料科学与工程学院, 西安 710048)

**摘 要** 采用着色腐蚀技术显示出过共晶球铁中的高温凝固组织, 观察分析过共晶球铁凝固过程中奥氏体的生长方式与形貌特征. 结果表明: 在非平衡凝固条件下, 过共晶球铁凝固时通常会析出初生枝晶和晕圈枝晶, 其形成条件主要与冷却速率和熔体的过冷有关. 随铸件模数  $M_c$  增大, 枝晶数量减少, 二次臂间距显著增大, 形态趋于不发达, 由初生枝晶向晕圈枝晶过渡. 当  $M_c \leq 0.3$  cm 时, 二次臂间距的实测值与理论预测值基本吻合. 初生石墨球周围往往形成环状封闭奥氏体壳; 共晶前期石墨球周围形成封闭或不封闭的框架奥氏体壳; 共晶后期石墨球往往被周边生长着的共晶奥氏体所覆盖, 最终成为共晶奥氏体的一部分.

**关键词** 球墨铸铁, 晕圈枝晶, 初生枝晶, 共晶奥氏体

**中图分类号** TG143.5, TG115.21 **文献标识码** A **文章编号** 0412-1961(2003)02-0136-04

## MORPHOLOGY CHARACTERISTIC AND GROWING MANNER OF AUSTENITE IN HYPEREUTECTIC DUCTILE IRON DURING SOLIDIFICATION PROCESS

XU Jinfeng, ZHAI Qiuya, YUAN Sen, WEI Bing

School of Materials Science and Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048

Correspondent: XU Jinfeng, associate professor, Tel: (029)2312069, Fax: (029)3240571,

E-mail: LMSS@nwpu.edu.cn

Supported by Natural Science Foundation of Shannxi Province (No.59120)

Manuscript received 2002-01-22, in revised form 2002-08-02

**ABSTRACT** The high-temperature solidification structures in hypereutectic ductile iron are shown clearly by the color etching technique, and the morphology characteristic and growing manner of austenite during solidification process are analysed. The results reveal that the forming conditions of both the primary austenite dendrite and austenite shell dendrite are mainly related to cooling rate and undercooling of melt. With increasing the casting modulus  $M_c$  the counts of dendrites reduce, the second arm space increases remarkably and the morphology of dendrites in hypereutectic ductile iron will be transformed from primary austenitic dendrite into shell dendrite. When  $M_c$  less than 0.3 cm the measured second arm space is in agreement well with that calculated theoretically. A ring-like austenite shell has formed around the primary graphite sphere. At the earlier stage of eutectic, the enveloped or non-enveloped frame austenite shell has formed. There is no austenite shell outer the nodular graphite formed in the later stage of eutectic. The austenite shell is a part of the austenite dendrites.

**KEY WORDS** ductile iron, austenitic shell dendrite, primary dendrite, eutectic austenite

工业上所用球铁合金大多是过共晶成分, 根据 Fe-C 平衡相图, 过共晶球铁凝固时没有奥氏体枝晶析出. 球铁的凝固组织特征是由紧密接触而又相互独立的共晶团组成. 石墨球独立形核、生长, 长大到一定尺寸时被奥氏体壳包围, 进一步长大只能通过奥氏体壳来输送碳原子. 同

时, 奥氏体壳在残余液体中连续长大, 直到相互接触终止凝固为止 (称为共晶团模型). 然而, 研究者发现<sup>[1-7]</sup>, 在非平衡凝固条件下, 共晶、甚至过共晶球铁中都会析出奥氏体枝晶. 奥氏体枝晶的析出, 必然会给石墨球及其周围奥氏体的形成造成影响. Lux 等<sup>[6]</sup>认为, 快速生长的奥氏体枝晶在与石墨球相遇时才导致石墨球周围奥氏体壳的封闭. Zhou 等<sup>[7]</sup>则认为围绕石墨的奥氏体壳不是一个连续的奥氏体壳, 而是由几个楔型的晶粒组成. 因此, 深入研究石墨球周围奥氏体壳的形成机制, 有助于深化对过共晶球铁凝固过程的认识及进行组织控制.

\* 陕西省自然科学基金资助项目 59120

收到初稿日期: 2002-01-22, 收到修改稿日期: 2002-08-02

作者简介: 徐锦锋, 男, 1963 年生, 副教授, 博士

## 1 实验方法

采用着色腐蚀方法<sup>[8]</sup>可将球铁铸态组织还原成高温凝固组织,依据不同色相显示出球铁中的枝晶形态,把初生枝晶与共晶奥氏体区别开来,并根据枝晶形态参数、石墨球大小、外围奥氏体壳厚度等将初生石墨球和共晶石墨球区别开来.采用 15 kg 中频感应炉熔制铁液.原生铁为本溪 Q12, 配入 10%(质量分数)A3 钢.出铁温度 1500 ℃,冲入法球化,球化剂为 QRMg8RE3, 加入量 1.8%.用 75SiFe 进行常规二次孕育,加入量 0.6%.粘土砂湿型,浇注温度 1400 ℃.试样成分(质量分数, %,下同)为: C 3.78, Si 2.33, Mn 1.25, P 0.064, S 0.025; 试样长 240 mm, 直径分别为 12, 24, 30, 60 mm.

在 4AMRAY-1000B 扫描电镜上观察球铁缩松区,以观察共晶前期的凝固组织形貌.

## 2 实验结果

### 2.1 奥氏体枝晶的析出及形貌特征

图 1 所示为直径 24 mm 试样缩松区枝晶形貌.枝晶主杆和二次分枝比较发达,按晶体学位向关系向空间延伸,具有典型的三维空间结构.枝晶成簇生长,构成球铁枝晶骨架.图 2 为不同直径球铁试样金相照片.图 2a 中枝晶形态十分发达,成簇生长,石墨球分布于晶簇的间隙;图 2b 中枝晶与初生石墨球周围的奥氏体壳长为一体,形态较发达,构成球铁骨架,共晶石墨分布其间.图 2c 中枝晶粗壮,不很发达.图 3 为球铁缩松区枝晶电镜照片.图 3a 中从球状晶体上长出一个小包,酷似枝晶生长的萌芽;图 3b 中,从球状晶体上长出细小枝晶;图 3c 中,从球状晶体上长出带二次分枝的粗壮枝晶.图 3d 中,枝晶尖端长出球状晶体;图 3e 中,枝晶尖端的球状晶体上又长出树枝晶.可以看出,枝晶均发源于球状晶体,且沿垂直球状晶体表面的法线方向生长,并逐渐向周围空间延伸.如把图 3 中 5 个视场联系在一起,从生长形态来看,可视为枝晶生长的 5 个瞬间.球铁中奥氏体枝晶按其析出过程及形成条件不同,分两种类型:(1)初生枝晶.初生枝晶是从共晶凝固温度以上的高温液体中独立形核、生长而形成的.其特点是,主杆细长而直,逆热流方向成簇生长,横穿整个凝固断面,分枝细且密,形态发达(图 2a).铁液过冷度愈大,奥氏体析出驱动力愈大,愈易形成初生枝晶;(2)晕圈枝晶.晕圈枝晶是从初生石墨球晕圈上长出的枝晶.其特点是,一次轴有限生长,二次甚至三次轴也有一定的发展,枝晶与初生石墨球通过晕圈长为一体(图 3).晕圈枝晶的形成与动力学条件有关,球铁铁液在一定温度下,首先析出初生石墨球.石墨球在液体中独立生长,其周围形成一定范围的碳逸减区,结晶成奥氏体壳,并不断向外围生长增厚.在生长过程中,一方面,生长着的奥氏体壳在其界面上放出热量,造成结晶前沿铁液中温度梯度减小,甚至出现负的温度梯度;另一方面,奥氏体向外部排碳,界面液体中碳浓度增大,形成一定的成分过冷.负



图 1 缩松区枝晶形貌二次电子像

Fig.1 Secondary electron image of dendrite in ductile iron bar

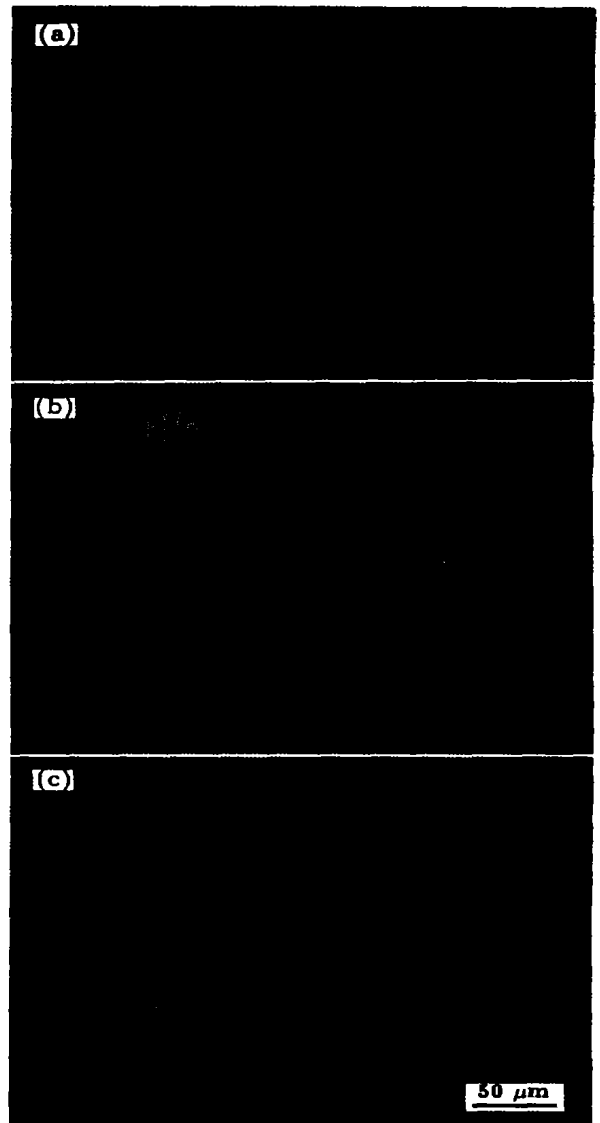


图 2 球铁中的枝晶形貌

Fig.2 Morphologies of dendrite in ductile iron bar  
(a)  $\phi$  12 mm (b)  $\phi$  30 mm (c)  $\phi$  60 mm

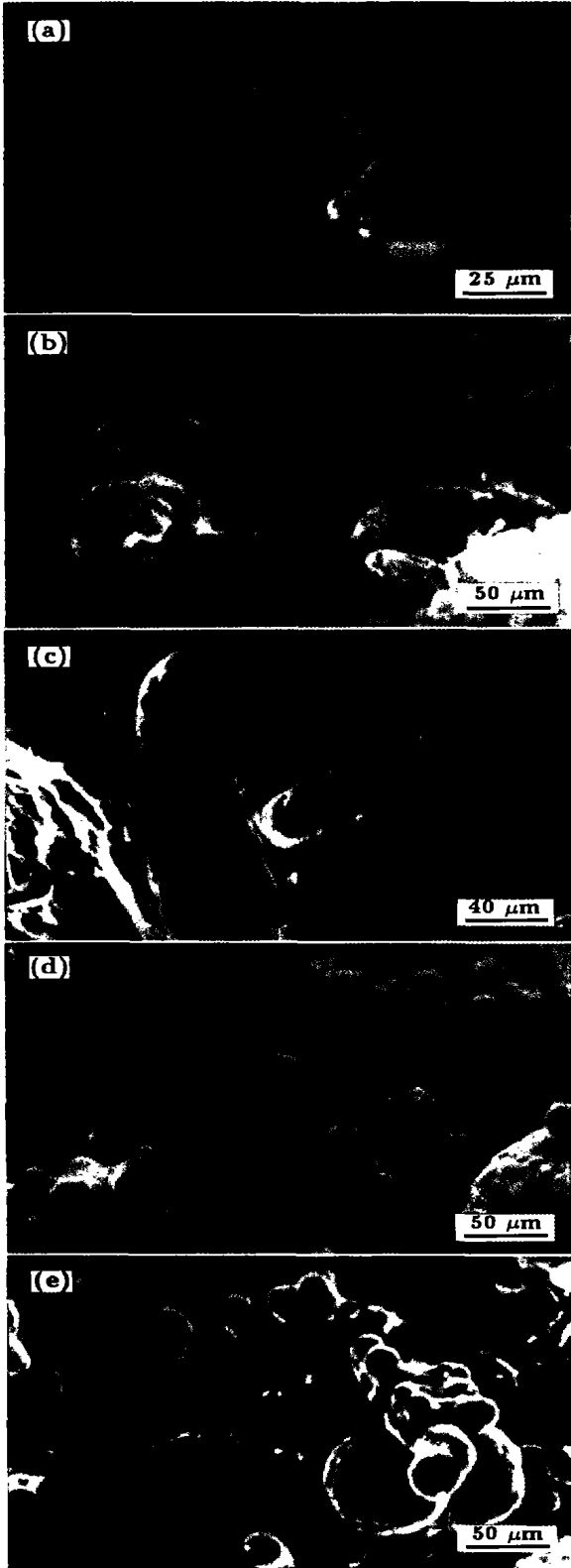


图3 晕圈枝晶生长过程二次电子像

Fig.3 Secondary electron images of austenitic shell dendrite (a) formation of dendrite tip from surface of spherical crystal (b) growth of primary arm (c) formation of second arm (d) formation of spherical crystal at the tip of second arm (e) formation of dendrite arm from surface of spherical crystal

的温度梯度加上成分过冷,使固-液界面变得不稳定而出现扰动现象.这时,扰动受传热条件支配,热流方向优先得到发展,形成奥氏体晶包,其生长速度很快,远远超过奥氏体壳沿径向的增厚速度而长出树枝晶.可见,球铁的初生凝固并不仅仅是初生石墨球的析出和长大,而存在石墨球 → 晕圈 → 树枝晶生长机制,如图4所示.

2.2 铸件模数  $M_c$  对奥氏体枝晶二次臂间距及析出数量的影响

定量金相分析结果表明,在化学成分、浇注温度及其它工艺条件不变的情况下,随铸件模数  $M_c$  增大,枝晶数量减少,枝晶形态趋于不发达(图5).根据枝晶生长理论,二次臂间距  $\lambda_2$  可以由下式求得 [9]

$$\lambda_2 = 5.5[Nt_f]^{1/3} \quad (1)$$

$$N = \frac{\Gamma D \ln(C_1^m / C_0)}{m(1-k)(C_0 - C_1^m)}$$

式中  $\Gamma$  为 Gibbs-Thomson 系数,  $D$  为扩散系数,  $m$  为液相线斜率,  $k$  为平衡分配系数,  $C_0$  为合金成分,  $C_1^m$  为液相最终成分,  $t_f$  为局部凝固时间.铁液热物性

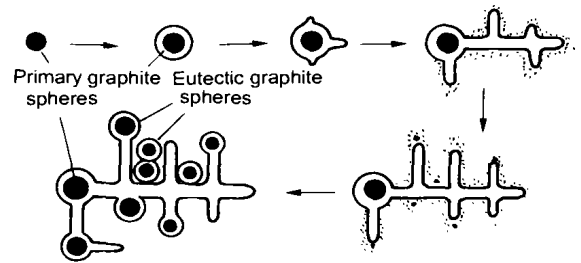


图4 晕圈枝晶生长方式

Fig.4 Growing process of austenitic shell dendrite

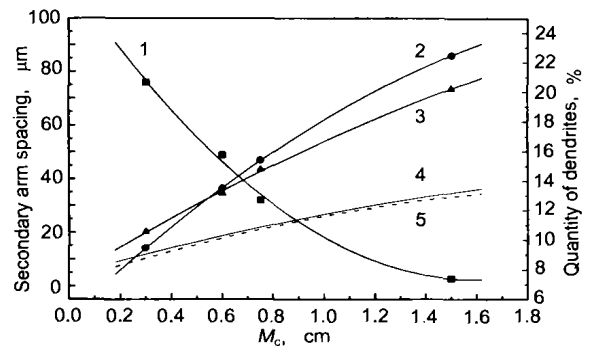


图5 模数对枝晶数量和形态参数的影响

Fig.5 Effects of  $M_c$  on quantity and morphology of dendrite

1 Quantity of dendrites (C.E=4.56) 2 Secondary arm spacing (C.E=3.95) 3 Secondary arm spacing (C.E=4.56) 4 Theoretically calculated value for secondary spacing (C.E=3.95) 5 Theoretically calculated value for secondary spacing (C.E=4.56) (C.E—carbon equivalent)

参数：潜热  $H_m=272$  J/g, 表面张力  $\sigma=1.872$  N/m,  $\Gamma=1.60\times 10^{-6}$  K·m,  $D=3.7\times 10^{-5}$  cm<sup>2</sup>/s,  $m=-90.70$  K/(mass fraction, %),  $k=0.49$ . 假设金属液浇入铸型后其过热量已全部散失, 作为一级近似,  $t_f$  可由 Chvorinov 建立的平方根定理求得

$$t_f \approx t_{\text{dendrite}} = M_c^2 \times K_{\text{dendrite}} \quad (2)$$

式中  $M_c$  为铸件模数,  $K_{\text{dendrite}}$  为枝晶凝固系数. 对于砂型铸造的球墨铸铁薄壁小件,  $K_{\text{dendrite}}=6$  min/cm<sup>2</sup>. 计算得到的二次臂间距如图 5 中曲线 4, 5 所示. 当  $M_c \leq 0.3$  cm 时实测值与理论预测值基本吻合. 当  $M_c > 0.3$  cm 时, 两者发生偏离, 实测值大于计算值. 表明随着  $M_c$  的增大, 熟化程度加剧, 二次臂间距显著增大.

### 2.3 共生奥氏体的生长形貌

初生石墨球周围存在厚度均匀、呈全封闭状的奥氏体壳, 其直径大约为石墨球径的 1.6—2.2 倍, 如图 6a 中箭头 1 所示. 对球铁试样进行腐蚀, 发现枝晶和石墨球周围的环状奥氏体壳上会出现多种颜色构成的彩色环, 如图 6b 所示. 采用电子探针对不同色区 Si, Mn 元素的偏析行为的研究发现, Si 的偏析规律与颜色的分布特征之间存在良好的对应关系<sup>[10]</sup>. 着色腐蚀彩色环直观而生动地刻画、再现了奥氏体壳的动态凝固过程, 反映了初生石墨

球周围奥氏体壳的封闭性. 这一特征与 Zhou 等<sup>[7]</sup> 在厚大断面中所观察的快速封闭壳现象基本一致.

数量较多, 尺寸相对较大的石墨球往往处于枝晶臂间, 或处于高次晶臂构成的框架之间. 球径大小与枝晶臂间距相近, 石墨球周围奥氏体壳厚度与枝晶臂直径尺寸相当. 接近枝晶中央、分枝发达的区域的石墨球周围存在完整的奥氏体壳, 而枝晶外围、分枝稀少的区域偶尔可见不完整的奥氏体壳, 如图 6a 中箭头 2 所示. 这种奥氏体壳或者封闭或者不封闭, 是奥氏体枝晶在生长、粗化过程中, 其高次臂与石墨球相遇并包围石墨球而形成的, 故称为框架壳. 共晶后期处于枝晶晶族间隙的细小石墨球周围的奥氏体是周围共晶奥氏体石墨球包覆形成的, 如图 6a 中箭头 3 所示.

在缓冷及石墨成核条件较好的情况下, 枝晶生长受到限制, 石墨球周围的奥氏体以环状封闭壳为主流形成离异共晶模式的凝固组织.

### 3 结论

(1) 在非平衡凝固条件下, 过共晶球铁凝固时通常会析出初生枝晶和晕圈枝晶, 其形成条件主要与由壁厚所决定的冷却速率及熔体过冷有关.

(2) 初生石墨球周围往往形成环状封闭奥氏体壳; 共晶前期石墨球则在枝晶臂间隙中形核生长, 尔后为枝晶高次臂所包围, 形成封闭或不封闭的框架奥氏体壳; 共晶后期石墨球往往被周边生长着的共晶奥氏体所包覆, 成为共晶奥氏体的一部分.

(3) 随铸件模数  $M_c$  增大, 枝晶数量减少, 枝晶二次臂间距变大, 形态趋于不发达.

### 参考文献

- [1] Loper C R, Heine R W, Reesman R W, Shah H. *AFS Trans*, 1967; 75: 541
- [2] Parks T W, Loper C R. *AFS Trans*, 1969; 77: 90
- [3] Wlodawar R. *Gelenkte Erstarrung Von GuBeisen*. GieBerei-Verlag: G.m.b.H., Dusseldorf, 1977: 286
- [4] Mulazimoglu M H, Yang Y M, Wallace J F, Ding N X, Mercer J L. *AFS Trans*, 1985; 93: 627
- [5] Zhou J Y, Xie Z H, Zhong F Q. *Fundry*, 1991; 3: 9 (周继扬, 谢祖华, 钟凤琪. 铸造, 1991; 3: 9)
- [6] Lux B, Mollard F, Minkoff I. *Proc 2nd Int Symp on the Metallurgy of Cast Iron*, Geneva, Switzerland, 1974: 371
- [7] Zhou J Y, Schmitz W, Engler S. *AFS Trans*, 1990; 23: 783
- [8] Xu J F, Yuan S, Wei B, Zai Q Y. *Fundry*, 1997; 11: 17 (徐锦锋, 袁森, 魏兵, 翟秋亚. 铸造, 1997; 11: 17)
- [9] Kurz W, Fisher D J. *Fundamentals of Solidification*. Switzerland: Trans Technol Publications Ltd, 1998: 85
- [10] Xu J F, Yuan S, Wei B, Zhai Q Y. *J Xi'an Univ Technol*, 1998; (1): 94 (徐锦锋, 袁森, 魏兵, 翟秋亚. 西安理工大学学报, 1998; (1): 94)

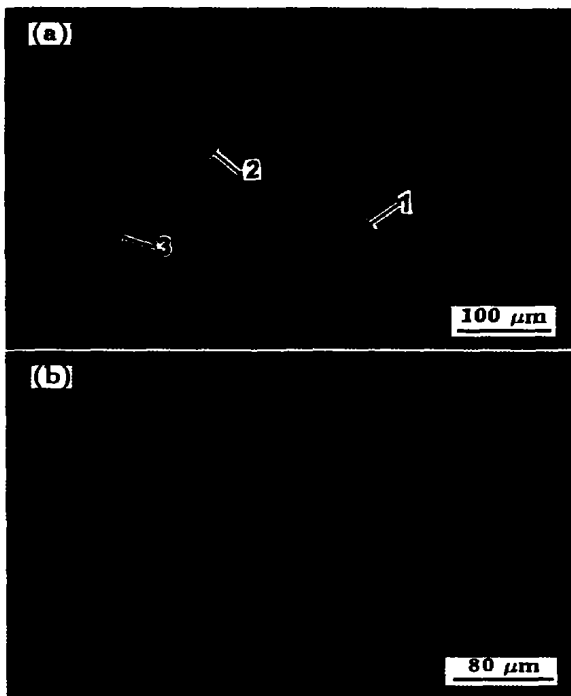


图 6 共晶奥氏体的生长形貌

Fig.6 Growing morphologies of eutectic austenite  
(a) morphologies of various eutectic austenite shell (b) a ring-like austenite shell  
1 Ring-like austenite shell 2 Frame austenite shell 3 Eutectic austenite from periphery